

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Milorad Vidović

Nenad Bjelić

Dražen Popović

SIMULACIJA LOGISTIČKIH SISTEMA

BEOGRAD

2024.

Milorad Vidović, Nenad Bjelić, Dražen Popović
SIMULACIJA LOGISTIČKIH SISTEMA
I izdanje

Recenzenti: dr Gordana Radivojević
dr Branislava Ratković
Za izdavača: dr Nebojša Bojović, dekan
Glavni i odgovorni urednik: dr Mirjana Bugarinović
Tehnički urednik: Predrag Knežević
Izdavač: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet,
Vojvode Stepe 305; telefon: 011 3976 017;
faks: 011 3096 704; <http://www.sf.bg.ac.rs>
Priprema: Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta;
telefon: 011 3091 344; idsf@sf.bg.ac.rs;
(skriptarnica) sfknjige@sf.bg.ac.rs
Štampa: Pekograf DOO,
Vojni put 258/d, 11080 Zemun;
telefon: 011 31 49 166; www.pekograf.com
Tiraž: 200 primeraka
ISBN 978-86-7395-477-6

Na osnovu odluke Uređivačkog odbora Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, broj 120/2 od 25. januara 2024. godine, odobrava se za upotrebu u nastavi kao osnovni udžbenik na osnovnim studijama za predmet „Simulacija logističkih sistema”.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

005.5:004.9(075.8)

ВИДОВИЋ, Милорад, 1957-2023

Simulacija logističkih sistema / Milorad Vidović, Nenad Bjelić, Dražen Popović. - 1. izd. - Beograd : Univerzitet, Saobraćajni fakultet, 2024 (Zemun : Pekograf). - 256 str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 200. - Spisak pojmova: str. 237-248. - Beleška o autorima: str. 255-256. - Napomene i bibliografske reference uz tekst. - Bibliografija: str. 225-234.

ISBN 978-86-7395-477-6

1. Бјелић, Ненад, 1977- [аутор] 2. Поповић, Дражен, 1981- [аутор]
а) Логистички менаџмент -- Апликативни програми

COBISS.SR-ID 139529737

Izdavač zadržava sva prava. Reprodukција pojedinih delova ili celine ove publikacije nije dozvoljena.

Sadržaj

Predgovor	7
1 PRIRODA SIMULACIJE	11
1.1 ISTORIJSKI OSVRT	16
1.2 VRSTE SIMULACIJE	18
1.3 SIMULACIONI ALATI	21
1.4 PARALELNA I DISTRIBUIRANA SIMULACIJA	25
2 PRINCIPI SIMULACIJE DISKRETNIH DOGAĐAJA I STRUKTURA MODELA	29
2.1 OSNOVNI POJMOVI I ELEMENTI SIMULACIONOG MODELA	30
2.2 PROTOK VREMENA U SIMULACIJI – KONCEPT SIMULACIONOG ČASOVNIKA	41
2.3 OSNOVNI PRISTUPI, FILOSOFIJE, ODNOSNO MEHANIZMI SIMULACIJE DISKRETNIH DOGAĐAJA	46
2.3.1 Pristup baziran na raspoređivanju događaja	49
2.3.2 Pristup baziran na skeniranju aktivnosti	50
2.3.3 Procesno-interakcijski pristup	51
2.3.4 Objektno orijentisani pristup	58
2.3.5 Pristup simulaciji baziran na korišćenju agenata	65

2.4	GENERISANJE SLUČAJNIH BROJEVA I SLUČAJNIH PROMENLJIVIH.....	67
2.4.1	Generisanje pseudoslučajnih brojeva	69
2.4.2	Generisanje slučajnih promenljivih	71
2.4.3	Testiranje pseudoslučajnih brojeva	80
3	RAZVOJ SIMULACIONOG MODELA	89
3.1	KONCEPTUALNI MODEL.....	89
3.1.1	Razumevanje problema	99
3.1.2	Utvrdjivanje ciljeva razvoja modela.....	100
3.1.3	Identifikacija ulaza i izlaza modela	101
3.1.4	Definisanje sadržine modela.....	101
3.2	OD KONCEPTUALNOG KA RAČUNARSKOM SIMULACIONOM MODELU	104
3.3	VALIDACIJA I VERIFIKACIJA SIMULACIONOG MODELA.....	110
3.3.1	Tehnike verifikacije simulacionih modela	115
3.3.2	Tehnike validacije simulacionih modela	119
4	MODELIRANJE ULAZNIH I ANALIZA IZLAZNIH PODATAKA....	125
4.1	MODELIRANJE ULAZNIH PODATAKA ZA SIMULACIONI MODEL	126
4.1.1	Modeliranje ulaznih podataka kada ne postoji mogućnost analize podataka o ponašanju sistema.....	127
4.1.2	Modeliranje ulaznih podataka kada je moguće doći do podataka o ponašanju sistema.....	130
4.2	ANALIZA IZLAZNIH PODATAKA SIMULACIONOG EKSPERIMENTA.....	138
4.2.1	Izlazne promenljive simulacionih eksperimenata.....	138
4.2.2	Priroda simulacionih eksperimenata i uticaj na prikupljanje izlaznih podataka	142
4.2.3	Analiza izlaznih podataka u svrhu poređenja alternativnih sistema	147
5	OPTIMIZACIJA SIMULACIJOM.....	151
5.1	GENETSKI ALGORITMI.....	153
5.2	METODA PROMENLJIVIH OKRUŽENJA	163
5.3	SIMULIRANO KALJENJE.....	171

6 PRIMERI SIMULACIJA LOGISTIČKIH SISTEMA	183
6.1 SIMULACIONA ANALIZA PRIMENLJIVOSTI REŠENJA DETERMINISTIČKOG IRP-A U SEKUNDARNOJ DISTRIBUCIJI GORIVA NA REALAN SISTEM SA STOHAŠTIČKOM POTROŠNJOM	184
6.2 OPTIMIZACIJA NIVOVA PORUČIVANJA U UPRAVLJANJU ZALIHAMA PRIMENOM ARENA SIMULACIONOG MODELA	191
6.3 SIMULACIONO-OPTIMIZACIONI MODEL ZA OCENU UTICAJA NOVOG KORISNIKA U DISTRIBUTIVNOM SISTEMU	195
6.4 SIMULACIONA ANALIZA STRATEGIJA UPRAVLJANJA SABIRNIM DELOM SORTIRNOG KONVEJERA	199
6.5 ANALIZA EFIKASNOSTI UPRAVLJANJA PRETOVARNIM SISTEMIMA SA DISTRIBUIRANIM RESURSIMA	207
6.6 SIMULACIONA ANALIZA I DIMENZIONISANJE FLOTE AUTONOMNIH ROBOTA ZA SORTIRANJE POŠILJAKA	217
Literatura	225
Spisak skraćenica	235
Spisak pojmova	237
Spisak slika	249
Spisak tabela	253
Beleška o autorima	255

Predgovor

Ova knjiga predstavlja poslednji rezultat rada profesora Milorada Vidovića na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, koja sadržajem u potpunosti odgovara predmetu na osnovnim studijama pod istim nazivom „*Simulacija logističkih sistema*”. Zajedno sa profesorom Slobodanom Cvetićem, profesor Vidović je u nastavni plan osnovnih studija Odseka za logistiku inicirao uvođenje predmeta „*Objektno orijentisana simulacija logističkih sistema*”. Na dotadašnjem Odseku za integralni i industrijski transport su blagovremeno prepoznate tendencije razvoja logističkog sektora i buduće potrebe privrednih i društvenih činilaca za kadrom osposobljenim za projektovanje i upravljanje sistemima iz te oblasti. Zato je krajem 20. veka napravljen nov nastavni plan koji je usled brojnih izmena u odnosu na dotadašnji uzrokovao i promenu naziva odseka u Odsek za logistiku. Jedan od novouvedenih predmeta, koji je u mnogome podigao nivo mogućnosti modelovanja logističkih sistema, je bio i predmet „*Objektno orijentisana simulacija logističkih sistema*” na kome su prva predavanja održana 2005. godine. Naziv predmeta se vremenom menjao u „*Objektno orijentisana simulacija*”, pa u „*Simulacija logističkih sistema*”, što je naziv pod kojim se i danas održava nastava na četvrtoj godini osnovnih studija. U toku 19 godina, koliko je držao predavanja na ovom predmetu profesor Vidović je održao preko 200 predavanja, pri čemu je poslednje predavanje održao 24. maja 2023. godine. Međutim, tu ne staje njegovo nesebično prenošenje znanja studentima iz ove zanimljive i nadasve korisne oblasti za kvantitativnu analizu logističkih sistema, jer će čitajući ovu knjigu i naredne generacije studenata biti u mogućnosti da uče od profesora i možda zavole simulaciju, što je sigurno bio i najznačajniji razlog pisanja ove knjige.

Iako je praksa u velikom broju knjiga iz ove oblasti da se značajan deo knjige posveti osnovi na kojoj ja bazirano simulaciono modeliranje, konkretno

teoriji verovatnoće i statistike, u ovoj knjizi će to biti urađeno na minimalno potrebnom nivou za razumevanje realizacije simulacionih modela. Naime, kako bi čitaoca ove knjige što pre zainteresovali za oblast simulacionog modeliranja logističkih sistema namjera nam je bila da naglasak u knjizi bude na ovladavanju potrebnim praktičnim znanjem i veštinama kako bi čitalac samostalno mogao što pre da uplovi u proces simulacionog modeliranja i eksperimentisanja. U tom smislu, sigurno da nezamenjivu ulogu ima i zbirka zadatka u kojoj je detaljno obrađen praktični aspekt modeliranja u dva veoma rasprostranjena simulaciona softvera ARENA-i i FLEXSIM-u.

U skladu sa naglaskom na praktičnu primenu simulacije u modeliranju logističkih sistema, ali i potrebu za razumevanjem osnova na kojima je bazirana realizacija odgovarajućih računarskih modela i simulacionih eksperimanata knjiga je organizovana u šest poglavlja. U prvom poglavlju čitaoca upoznajemo sa razvojem simulacionog modeliranja kroz istoriju, sa problemima na kojima je simulacija dokazala svoju moć, kao i razvoj alata kroz vreme na kojima je simulaciono modeliranje realizovano. Na kraju poglavlja se okrećemo budućnosti simulacije kroz uvid u oblasti paralelne i distribuirane simulacije, što, bar iz današnje perspektive, deluje kao pravac u kojem će se simulacija sigurno kretati. U drugom poglavlju zalazimo „pod haubu” simulacionih modela. Konkretno, predstavljamo koncepte slučajnih brojeva i promenljivih, protoka vremena u modelima i načine realizacije procesa. U trećem poglavlju, sa filozofskog, ili kako je profesor Vidović voleo da naglasi, filozofskog stanovišta bavimo se modelovanjem, odnosno pretvaranjem realnog sistema, sa svim bitnim karakteristikama, u simulacioni model. Konkretno, prelazimo sve bitne korake u razvoju simulacionog modela, od konceptualnog do računarskog, sa poslednjim ključnim korakom validacije i verifikacije modela. U četvrtom poglavlju se bavimo onime bez čega dobar simulacioni model ne može da postoji, kao i onime zbog čega se simulaciono modeliranje i realizuje, odnosno modeliranjem ulaznih podataka i prikupljanjem i analizom izlaznih podataka, respektivno. I dok modeliranje ulaznih podataka podrazumeva široku lepezu znanja neophodnih za predstavljanja ulaznih podataka velikim brojem teorijskih raspodela, u prikupljanju i analizi izlaznih podataka se bavimo osnovama statističke analize koje nam u praksi omogućavaju da dođemo do odgovora postavljenih na početku modelovanja o karakteristikama posmatranog sistema ili poređenju više alternativa sistema. Peto poglavlje čitaoca upoznaje sa nezamenjivom primenom simulacije u oblasti rešavanja problema kombinatorne optimizacije i to konkretno u realizaciji nekih od najzastupljenijih metaheurističkih algoritma (genetski algoritmi, metoda promenljivih okruženja i simulirano kaljenje), koji se prema današnjim trendovima smatraju jednom granom veštačke inteligencije. Ovo poglavlje, kao i sledeće, šesto, mogu se smatrati monografskim jer su prožeti primerima istraživačkih studija u čijim realizacijama su učestvovali autori knjige. Dok je cilj primera u petom poglavlju bio prikaz primene pomenutih metaheurističkih algoritma sa integrisanom primenom slučajnih brojeva, dotle je celo šesto poglavlje namenjeno upoznavanju čitaoca sa praktičnim modelovanjem. Konkretno, na

šest primera logističkih procesa na različitim nivoima upravljanja dat je detaljni prikaz razvoja simulacionih modela, od opisa realnog problema, preko prikaza konceptualnog modela, do prikaza osnovnih rezultata dobijenih simulacionim eksperimentisanjem. Na taj način smo želeli da čitaocima na praktičnim primerima pokažemo šta sve podrazumeva realizacija simulacione studije.

Na kraju želimo da napomenemo da je poseban pečat u pisanju knjige ostavio profesor Vidović, a što se oslikava i u velikom broju zanimljivih i značajnih izvora literature, ali najpre u stilu pisanja, po kojem je bio jedinstven i prepoznatljiv svima koji su sa njim sarađivali.

„Stvari su mjerilo vida, a san je njihova sjena.” – Augustin Tin Ujević

U Beogradu, januar 2024.

Autori